

晴空亂流(CAT)之現象及其成因

張瑞翔

Phenomena of CAT and Their Causes

R. S. Chang

Abstract

Jet planes have taken advantage of Jet Streams on eastbound flights. But the Clear Air Turbulences (CAT) associated with Jet Streams are severe flying hazards that both flying crew and weathermen are concerned about.

The discovered phenomena of CAT are discussed. The author also suggests some possible reasons which causes the CAT phenomena.

一、前言

自噴射氣流 (Jet Stream) 被發現後，雖已成為噴射機順風飛行之助力，但因其存在而附帶產生之晴空氣流，(Clear Air Turbulence 簡稱 CAT) 則變為飛行之重要妨礙；其所造成之亂流現象，不但使乘客難以忍受，且因其亂流之加速，而形成之超 G 現象，可使飛機結構損傷，或發生意外事件。在冬季遠東區之日本以及夏威夷附近常有 CAT 發生 (本人在民國五十六年九月十一日，乘環球航空公司七〇七機由大琉球飛往舊金山之途中，在夏威夷曾遇有三次 CAT 現象，其中最嚴重之一次為 90ft/sec 之紀錄，當時之飛行高度為三萬呎。) 故現有之遠程航行事先對 CAT 應必須有所瞭解，併儘量避開飛行，免遭不測。到目前為止，經過各國空軍及航空公司之實際調查，僅對 CAT 有初步認識，氣象人員藉高空資料，只可定出 CAT 之可能位置，而其真正之成因，以及其真正之強度，迄今尚未能找出結論，故僅提出各國之調查結果，供作參考。

二、CAT之現象

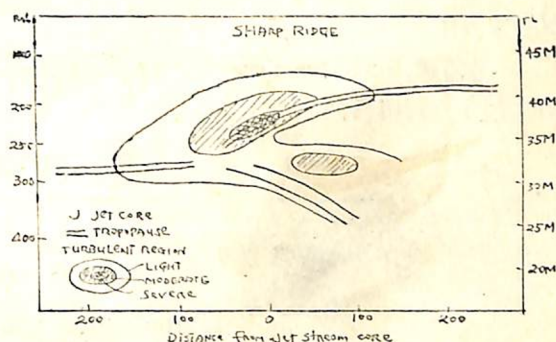
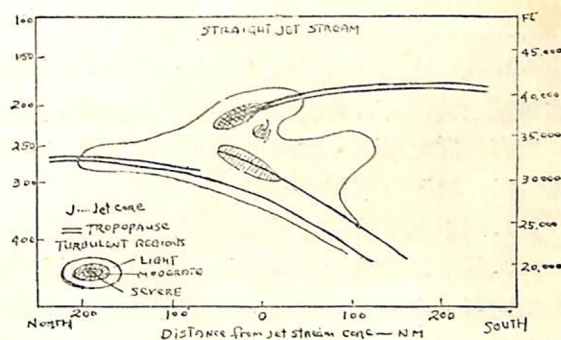
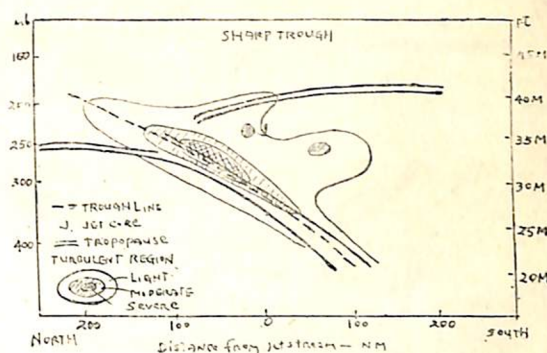
(一)根據調查，飛機附有加速錶 (accelerometer) 之裝置，測得在距噴射氣流中心約百哩處遭遇 CAT。當飛機穿過噴射氣流中心時，則飛行平穩。

(二)美空軍噴射氣流調查飛行，測得在噴射氣流左150哩及右300哩處有CAT現象。

(三)加拿大空軍 Clodman氏調查，發現當平行於噴射氣流飛行時，其亂流之強度較橫穿噴射氣流時為強。

(四)Endlich氏根據理論與 B-47調查之結果，發現CAT出現最多之區域為圖 I II III 所描述三種標準型式，其發生CAT原因，為此三區適宜於風、穩定

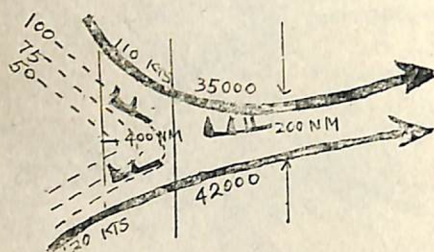
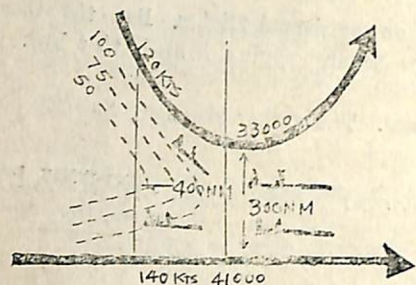
度及平流常易超變化之區域。當氣流進入上切迹三



區時，由於風切、不穩定、及不同氣流之原因，而產生亂流，輕度亂流出現在氣流之進入區域，嚴重亂流出現在深槽、峭脊與噴射氣流之會合處。因上述之兩區域因地轉平衡作用造成明顯之亂流，而中

度亂流僅出現在噴射氣流中心或僅深槽處。

(ii)根據飛機之實際觀測又發現輕中度之亂流常與卷雲出現有關。此因為動力不穩定或動力對流作用所造成。



Kadlec由美國東方公司之飛行調查，發現中度與嚴重之亂流。有時出現在明顯之風切區，此處不一定有卷雲之出現。此時氣流之型式如圖V，並根據統計，發現有下列之情形：

- 1.圖中之兩噴射氣流相距必須在300哩以內，
- 2.圖中風變線約在300mb之高度上，最好是最大風速層。由圖中可看出，風變之方向是在噴射氣流南方之西—西北象限中，或噴射氣流北方之西—西南象限中。
- 3.水平風切最強處如圖中所指，係距槽線或上坡風之後方約四百哩處。

渦流區之水平寬度					
水平寬度(哩)	<10	10-19.9	20-29.9	30-39.9	40-49.9
出現頻率(%)	31.5	21.4	9.5	10.1	6.5
50-59.9		60-69.9	70-79.9	80-89.9	90-99.9
4.8		2.4	2.4	0.6	1.2
100-149.9		150-199.9	>200		
6.5		2.4	0.6		

三、CAT之生成原因：

1. Richardson氏認為垂直風切(有時水平風切

4.若情況如圖IX所述時。則嚴重亂流之發生區，約在北支噴射氣流南邊七十五哩處，或南支噴射氣流北邊七十五哩處。

5.在此情況下適宜飛行之高度為25000呎-27000呎。根據實際試驗由於加速錶上之加速記錄發現垂直之風速與造成飛機上下顛動之距離可由下式表示之：

$$W_{de} = \frac{2b\Delta n}{\rho_0 K a V_i}$$

式中 W_{de} ——代表陣風風速 (ft/sec)

ρ_0 ——海平面之空氣密度

b ——機翼負荷 (lb/ft)

Δn ——加速度之增加值，單位為重力加速度 ($\Delta n = n - 1$) n 為全重力加速度 (單位為 g)

K ——是代表陣風之非向量值

V_i ——飛機之水平真速

a ——上升之坡度

b 與 a 因機型不同而異。

由此式可看出因機型不同而同一情況可造成不同之加速。

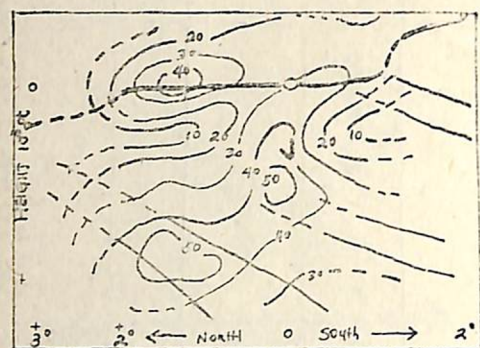
(i)調查迄今發現輕中度亂流經常出現，嚴重亂流之頻率很少，普通在250mb之高度上，15%情形造成2ft/sec之亂流。0.25g已造成飛行之不穩定，到達0.5g時則形成嚴重之亂流，第7頁之表為遭遇亂流情形之詳細調查表。

(ii)由於英國BOAC調查之結果發現每年3000小時之飛行中，每兩星期有1.5g一次，(1.5g $\approx$ 36 ft/sec = 10.5m/sec) 每四年有一次2.0g之記錄，下表為165之飛行調查中發現CAT之水平寬度百分率，由表中可看出其寬度很窄。

CAT實際觀測表 (1953—1958)

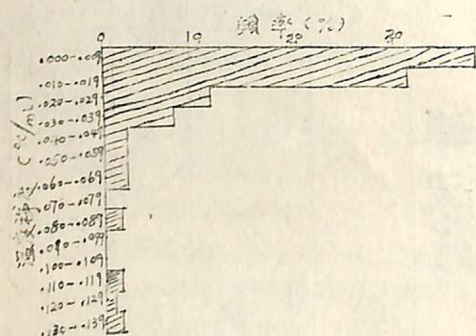
資料來源	飛行高度	CAT頻率最多之高度	亂流強度	出現頻率	最大加速	亂流範圍		
						水平	垂直	最大
1. Bannon		28000'—32000'			0.7g			
2. Bindon	24000'				3g			
3. Clem	25000'—45000'	40000'—44000' 其次為34000' 北美東北之上空	輕 中 嚴	19% 12% 2%		15—60公里	500'—2000'	100'—15000'
4. Clodman	18000'—40000'	18000'—38000' 南部加拿大上空	中度—嚴重 嚴重	35公里出現1次 85公里出現1次 440公里出現1次		>450公里	3000'	100'—15000'
5. Cunningham						50% < 30公里	6.9—328里公	500'—3000'
9. Estogue	150mb 200mb 250mb... 300mb... 350mb	日本 歐洲、土耳其與北美	10 5 2 ft/sec 0.02 0.16 2.0% 10 5 2 ft/sec 0.09 0.75 9.0% 10 5 2 ft/sec 0.15 1.2 15.0% 10 5 2 ft/sec 0.11 0.88 11.0% 10 5 2 ft/sec 0.08 0.72 9.0%					
7. Heath-Smith		25000'以下減弱 25000'以上增強			0.8g (20ft/sec)			
8. Hislop	25000' 35000'		4ft/sec 8ft/sec 12ft/sec	13公里1次 97公里1次 650公里1次	1.5g (235ft/sec)	75—100公里	10—900米	
9. yde	49000'—28000'		輕度—中度 嚴重 嚴重	28% 7% 1%	2.5—4g			
10. Kuettnet	40000'				+3g -2.5g (21m/sec)			
11. Pinus	400mb—200mb		0.1g 0.2g 0.3g	37.4% 4.9% 0.2%				50% < 80公里 > 800公里 50% < 2000' 100—10000'
12. Murray								遭遇之嚴重CAT都與很厚

之觀測中，其中五十六次在噴射氣流附近，並且其主要產生區在主噴射氣流下方之氣旋區域，此與上述Endlich氏所發現相同，次要產生區為對流層頂



附近噴射氣流之氣旋區，上述兩區之Richardson number 都很小。上圖為1950—1951年之九次噴射氣流調查之結果，由圖上可看出噴射氣流氣旋區出現之CAT數較反氣旋區為多已很明顯，並發現嚴重之CAT與斜壓區相配合。

2. 由於水平溫度梯度所造成：一般觀念認為垂直空氣之不穩定可造成強烈之對流而形成湍動。那僅是低空對流層之現象，而在高空則層疊之穩定氣流為造成CAT之另一原因，此話初聽，很覺矛盾，但實際由於Cunningham氏之研究與調查，由下圖可看出此一事實之證明。另根據飛機之實際飛行，在穩定層與斜壓區CAT之頻率很大，當飛機直角橫穿一平穩之氣層時CAT之可能性很小，但是當飛機以斜角穿過此一穩定層時則CAT之頻率很大。



3. 地形作用（或山坡作用）：遠東區日本之富士山區及美國之落磯山區為造成CAT之兩主要區域，落磯山區之Grand Junction台在9—15公里之高度上經常有62%之持久性亂流，其原因乃由於山坡所形成之動態作用（high kinetic energy），並

已由調查證明，山坡區之CAT都很強烈，故必須注意。

四、結論：

1. 噴射氣流附近有CAT之出現已予證實，其強度之預測尚待研討。
2. 噴射氣流氣旋區CAT之頻率較反氣旋區為多。
3. 噴射氣流經過之山區為造成嚴重CAT之主要地帶必須加以注意。
4. 明顯之風切，水平溫度梯度等為造成CAT之主要原因，但仍須加以研究。
5. 國際民航機構曾要求各國之民航機構及空軍，對遭遇CAT之情況加以統計，以求進一步之瞭解。
6. 在海洋上空CAT之出現區域多在噴射氣流之反氣旋邊。

（上接 20 頁）

易風兩者在該區內的氣旋式風切。有時候，緯流可能在此等區域變為等正壓不穩定，在此種情況，便會造成等正壓式擾動。

除能源問題外，還有若干有關的問題值得注意。其中特別有趣的，是不同型式波狀擾動和雲及降水型間的關係。為了在熱帶地區作準確的天氣預報，是否必須要瞭解並且能夠預測所有熱帶波的運動？人們會希望，垂直傳播擾動的結構和運動不必詳細解釋，特別是垂直波長小的擾動。同樣有趣的是，熱帶波狀擾動如何以及以何種時間比例影響中緯度環流型的問題。這將最後決定在中緯度作展期預報所需要的熱帶觀測密度。氣象專家們希望，美國國家科學院的全球大氣研究計劃的種種分項計劃，將對其中若干問題提供確定的答案。

園 地 公 開
歡 迎 賜 稿